

УДК 532.517

# ВЗАИМНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ И СПЕКТРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНКИ

В. А. ВОСКОВОЙНИК

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина**Получено 18.04.2011*

Представлены результаты экспериментальных исследований поля пульсаций пристеночного давления, которое формируется при турбулентном обтекании глубокой сферической лунки. Поведение взаимных корреляционных и спектральных характеристик свидетельствует, что внутри лунки генерируются наклонные асимметричные крупномасштабные вихри. Эти вихревые структуры переключаются из одного наклонного положения в другое, возбуждая низкочастотные модулирующие колебания. Наклонное расположение вихревых структур обуславливает появление антикорреляции (противофазные колебания) в поле пульсаций пристеночного давления на противоположных боковых стенках сферической лунки. В ходе эволюции асимметричные вихри выбрасываются над кормовой стенкой лунки, причем угол выброса увеличивается с ростом числа Рейнольдса.

Наведено результати експериментальних досліджень поля пульсацій пристінного тиску, яке формується при турбулентному обтіканні глибокої сферичної лунки. Поведінка взаємних кореляційних і спектральних характеристик свідчить, що всередині лунки генеруються похилі асиметричні великомасштабні вихори. Ці вихрові структури перемикаються із одного похилого положення в інше, що призводить до збудження низькочастотних модулюючих коливань. Похиле розташування вихрових структур обумовлює появу антикореляції (протифазні коливання) у полі пульсацій пристінного тиску на протилежних бічних стінках сферичної лунки. У ході еволюції асиметричні вихори викидаються над кормовою стінкою лунки, причому кут викиду збільшується з ростом числа Рейнольдса.

The paper deals with presenting of the results of experimental studying of wall-pressure fluctuation field forming at the turbulent flowing above the deep spherical dimple. The behavior of the cross-correlation and spectral characteristics shows that the inclined asymmetric large-scale vortices are generated inside the dimple. These vortex structures are switched from one tilt to another, exciting the low-frequency modulating oscillations. The inclined location of the vortex structures stipulates the appearance of anticorrelation (the antiphase oscillations) in wall-pressure fluctuation field at the opposite lateral walls of the spherical dimple. In course of evolution, the asymmetric vortices are ejected above the aft wall of the dimple and their ejection angle increases with the Reynolds number.

## ВВЕДЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные работы [1–3] показывают, что интенсивные пульсации пристеночного давления могут приводить к генерации значительного гидродинамического шума и вибраций. Ситуация усложняется и может быть чревата разрушениями и отказами, если пульсации давления имеют частоты и волновые числа, соответствующие резонансным модам колебаний обтекаемых конструкций и оборудования. Поэтому хорошее знание и понимание пространственно-временного поведения и частотно-волновых характеристик поля пульсаций пристеночного давления необходимо для того, чтобы снизить вибрации и шум неустойчивых течений, к которым, в первую очередь, относятся турбулентные и отрывные потоки.

Несмотря на то, что большое количество публикаций посвящено изучению статистических свойств пульсаций пристеночного давления, име-

ется ряд вопросов, которые требуют уточнения и более глубокого изучения. В частности, это относится к физической природе гидродинамических явлений, ответственных за статистические параметры поля давлений [3–5]. Это особенно важно с практической точки зрения, поскольку углубление знаний о гидродинамических вихревых структурах, генерирующих пульсации пристеночного давления, поможет в создании стратегии контроля и управления ими и модификации поведения пристеночного давления. Экспериментальные исследования сложных отрывных потоков и численное моделирование более простых конфигураций течения свидетельствуют об определенной связи между пульсациями давления и пристеночными вихревыми структурами (в том числе и со статистической точки зрения). Например, в работах [6–8] даны оценки влияния пристеночных квазипродольных вихревых структур на поле пульсаций давления. В работах [9–11] приведены корреляции и спектры пульсаций давления на обте-

каемой поверхности и их взаимосвязь с генерирующими давление источниками пульсаций. В исследовании [12] проведены одновременные измерения поля скоростей и пристеночных давлений и указан физический механизм, ответственный за генерацию положительных и отрицательных пиков давления на обтекаемой поверхности. В работе [13] указана связь между волновым спектром пульсаций давления и физическими параметрами, описывающими турбулентный пограничный слой. Утверждается, что высоковольтные составляющие спектров обусловлены действием гидродинамических структур, находящихся в пристеночной области, а низковольтная или низкочастотная область спектра генерируется крупномасштабными структурами, формирующими внешнюю область пограничного слоя. Это коррелирует с утверждениями, встречающимися в [14, 15].

Хорошо известно, что крупная шероховатость, а также глубокие выемки и углубления на обтекаемой поверхности являются источниками интенсивных пульсаций скоростей и давлений, которые гидроакустическими приемниками воспринимаются как гидродинамический шум [16–19]. Имея звуковую и псевдозвуковую природу, он обуславливает не только высокую акустическую нагрузку на окружающую среду, но и вызывает значительные вибрации обтекаемой поверхности. Течение в углублениях является сложным процессом с обратной связью. Конвективные неустойчивости растут, насыщая сдвиговой слой, а затем сталкиваются с кормовой стенкой исследуемого углубления. Петля обратной связи замыкается, в результате чего энергия возмущений трансформируется в волну неустойчивости на передней отрывной кромке лунки [20–23]. Как результат генерируются мощные частотные тоны внутри лунки и ее окрестности. Изучение и учет полей пульсаций давления и виброакустических характеристик обтекаемых поверхностей имеет большое значение на стадии проектирования и эксплуатации объектов, движущихся в жидкости, а также при проведении мероприятий по улучшению экологической обстановки вблизи транспортных магистралей.

С практической точки зрения можно выделить три аспекта, требующие изучения особенностей поля пульсаций пристеночного давления. Во-первых, экспериментальные исследования пульсаций пристеночного давления датчиками, установленными заподлицо с обтекаемой поверхностью, не нарушают структуру течения, что имеет определяющее значение при нахождении кинематических и динамических характеристик течения. Конкретные области спектров давления

изучаются посредством законов масштабирования и/или характеристик затухания коррелированных или когерентных сигналов. Определенные свойства функций пространственно-временных корреляций и взаимных спектров дают возможность адекватно оценить характерные масштабы длины и времени исследуемой турбулентности. Во-вторых, спектры пристеночных пульсаций давления дают количественную информацию о взаимодействии вихревых структур между собой и с обтекаемой поверхностью. В-третьих, в буксируемых гидроакустических комплексах и антеннах, а также в системах, где используются приемники звуковых давлений, большое значение имеет знание пространственных и временных характеристик гидродинамического шума, генерируемого потоком и взаимодействующего с обтекаемой поверхностью. В таких системах гидродинамическая помеха компенсируется или подавляется посредством специальных электронных устройств и методов обработки регистрируемых сигналов (например, методом группирования приемников по соответствующему алгоритму).

Наряду с этим датчики пульсаций пристеночного давления находят широкое применение при изучении источников акустических и псевдозвуковых колебаний, а также в средствах активного управления пограничным слоем, где датчики пульсаций давления, установленные заподлицо с обтекаемой поверхностью, применяются совместно с различными актуаторами в цепях обратной связи [20, 24–26]. Использование ансамблей датчиков, формирующих корреляционные блоки на обтекаемой поверхности, и статистических методов обработки и анализа измеренных данных (пространственно-временных корреляций и взаимных спектров) позволяет определить кинематические и динамические характеристики источников пульсаций давления. В результате, применяя разнообразные методы борьбы с окружающими помехами, удается определить масштабы давления генерирующих источников, их частоты вращения, направления движения и скорости переноса, времена жизни и степень вырождения в пространстве и времени.

Цель данного исследования – экспериментально изучить особенности формирования и развития крупномасштабных вихревых структур внутри глубокой сферической лунки на плоской поверхности, обтекаемой турбулентным потоком. На основе полученных данных будет определено поле пульсаций пристеночного давления, генерируемое псевдозвуковыми источниками, в качестве которых выступают вихревые структуры.

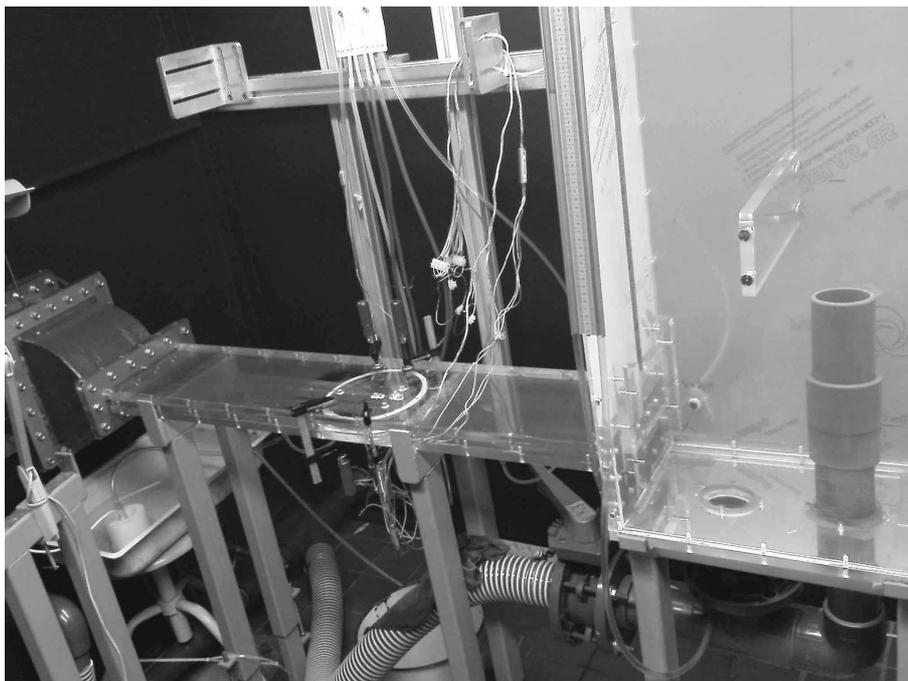


Рис. 1. Экспериментальный стенд и местоположение исследуемой сферической лунки на стенке узкого гидродинамического канала

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в узком гидродинамическом канале Университета г. Росток (Германия), см. рис. 1. Вода в канал, имеющий длину рабочей части порядка 1.3 м, ширину 0.2 м и высоту 0.015 м, подавалась насосом через успокоительную камеру и диффузор в резервуар, формируя установку замкнутого типа. Скорость в канале изменялась от 0.2 до 1.3 м/с посредством заслонок, установленных на трубопроводе обратной связи. Канал был выполнен из толстого полированного органического стекла для проведения визуальных и лазерных доплеровских измерений скорости, внутренняя поверхность которого была гидравлически гладкой. В середине нижней стенки канала было сделано отверстие диаметром 0.18 м, в которое устанавливалась вставка, имеющая в своем центре сферическую лунку диаметром 46 мм, глубиной 12 мм (относительное углубление 0.26), чья обтекаемая поверхность также полировалась и была гидравлически гладкой. Крепление вставки на стенке канала позволяло поворачивать ее на произвольный угол, что обеспечило существенное расширение возможностей корреляционных измерений ансамблем датчиков пульсаций давления и статического давления, установ-

ленных как внутри лунки, так и на стенке канала.

Визуальные исследования проводились с применением красящих веществ, подаваемых через дренажные отверстия на обтекаемой поверхности, а также водорастворимых покрытий, которые наносились на стенку канала. Картины визуализации регистрировались цифровыми фотоаппаратами и видеокамерами, обрабатывались на персональных компьютерах и графических станциях по стандартным и специально разработанным программам и методикам.

Поле пульсаций пристеночного давления регистрировалось миниатюрными пьезокерамическими датчиками пульсаций давления мембранного и стержневого типов. Датчики, имеющие диаметры чувствительной поверхности 1.6 и 1.3 мм соответственно, устанавливались заподлицо с обтекаемой поверхностью лунки и плоской стенки вставки. Учитывая интегрирующую способность поверхности датчиков, в исследованиях регистрировались источники пульсаций давления, длина волны которых превышала диаметр чувствительной поверхности. При установке миниатюрных датчиков заподлицо с обтекаемой поверхностью поток не нарушался, хотя на искривленной поверхности лунки некоторое искажение ее гладкости имело место, независимо от того, что стык между корпусом датчика и исследуемой поверхностью загла-

живался специальным герметиком.

Поле статического давления и его низкочастотные осцилляции измерялись посредством пьезорезистивных датчиков давления, чувствительная поверхность которых через дренажное отверстие диаметром 0.8 мм сообщалась с исследуемым течением. Эти датчики обладали повышенной чувствительностью, обеспеченной применением тонкостенной кварцевой мембраны, на которой напылялись электронные элементы, формирующие электрическую мостовую схему.

Датчики пульсаций пристеночного и статического давлений устанавливались в специальные монтажные отверстия и узлы крепления на обтекаемой поверхности лунки и съемной вставки, как показано на рис. 2. Датчик пульсаций давления № 1 располагался перед сферическим углублением на поверхности стенки канала и регистрировал пульсации пристеночного давления в пограничном слое, не нарушенном углублением. Внутри лунки датчики устанавливались на расстоянии 0.01 м друг от друга, а датчик № 3 располагался в центре лунки на ее дне. Позади лунки датчики находились на расстоянии 0.015 м друг от друга, а первый по потоку их ряд (ближнее поле лунки) находился на расстоянии 0.015 м от кормовой кромки лунки.

Экспериментальные исследования поля пульсаций давления и статического давления проводились ансамблем датчиков (12 датчиков пульсаций давления и 3 датчика статического давления). Датчики пульсаций давления через предварительные усилители, располагаемые как можно ближе к датчику (в целях уменьшения уровней электромагнитных и вибрационных помех) электрически соединялись с малошумным восьмиканальным усилителем мощности. Для проведения одновременных измерений и определения пространственно-временных характеристик поля пульсаций давления используемые датчики соединялись с шестнадцатиканальным аналого-цифровым преобразователем. Преобразователь в виде монтажной платы был установлен в системный блок персонального компьютера. В исследованиях использовался преобразователь фирмы National Instruments, оснащенный пакетом прикладных программ математического моделирования для решения задач технических вычислений MatLab 9.0.

Перед проведением исследований и в их ходе посредством датчиков вибраций постоянно контролировалась вибрационная обстановка на экспериментальном стенде. Вибрационная помеха учитывалась при обработке и анализе экспериментальных данных. Наряду с этим были проведены

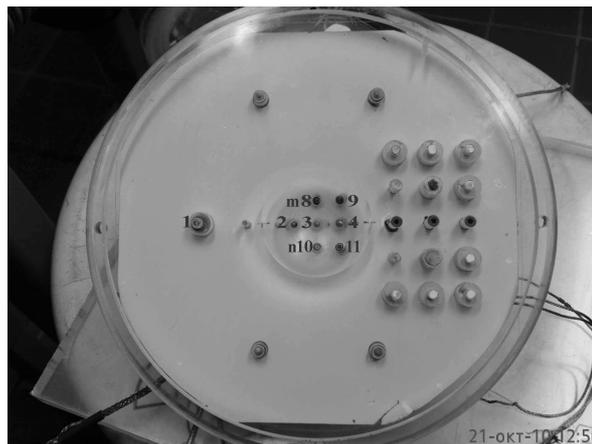


Рис. 2. Расположение датчиков пульсаций пристеночного давления в сферической лунке

соответствующие мероприятия по снижению электромагнитных, вибрационных и акустических помех при проведении инструментальных исследований, что позволило значительно расширить динамический диапазон измеренного поля давлений. В результате погрешность измерений интегральных характеристик поля пульсаций пристеночного давления составляла не более 4 %, корреляционных результатов – не более 6 %, а спектральных характеристик – не более 2 дБ в исследуемом диапазоне частот с доверительным интервалом 0.95 или  $2\sigma$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перед инструментальными исследованиями поля пульсаций пристеночного давления была проведена визуализация течения, которая позволила определить характерные области формирования и развития крупномасштабных вихревых структур внутри сферической лунки. Обнаружено, что при малой скорости течения, для которой определенное по диаметру лунки и среднерасходной скорости число Рейнольдса составляет  $Re_d \leq 20000$ , внутри лунки формируется симметричное вихревое течение. Когда скорость потока растет и течение становится турбулентным, в лунке генерируются асимметричные вихревые системы. Так, на рис. 3 показаны фотографии перемещения краски, подаваемой вдоль срединного сечения лунки, для числа Рейнольдса  $Re_d = 40000$  (направление течения сверху вниз). Видно, что струйки краски перемещаются по линиям тока крупномасштабного вихря, формируемого внутри лунки. Так, из отверстия на передней стенке лунки красящее вещество

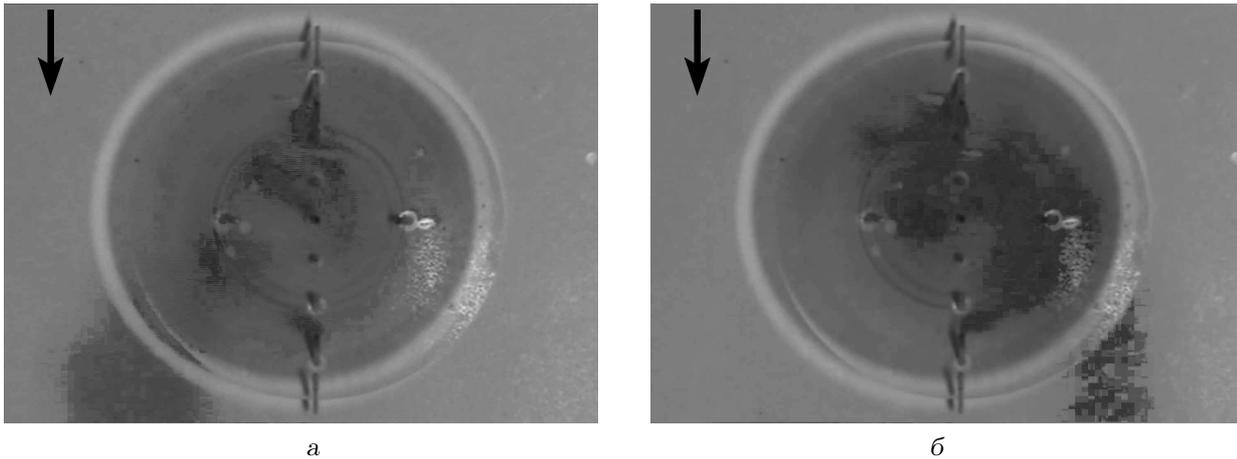


Рис. 3. Визуализация переключения вихревого течения внутри лунки и положение выброса вихревых структур для турбулентного течения при  $Re_d = 40000$

поступает в источник асимметричного вихря, расположенный наклонно к направлению потока (на рис. 3, а – справа налево, а на рис. 3, б – наоборот, слева направо). Из отверстий на дне лунки и кормовой стенке струйки краски перемещаются в одну и ту же сторону (по направлению вращения крупномасштабного вихря). Как показали исследования, вихревая структура в одном из наклонных положений для турбулентного режима течения с числом Рейнольдса  $Re_d = 40000$  находится в течение порядка (30...40) с. Затем наблюдается переключение вихревого течения на противоположную сторону лунки, где вихрь пребывает приблизительно такое же (но довольно часто и меньшее) время. Находясь в одном из наклонных положений, вихревая структура периодически выбрасывается над кормовой стенкой лунки (на рис. 3, а – слева, а на рис. 3, б – справа). С увеличением числа Рейнольдса асимметричные вихревые структуры выбрасываются из глубокого сферического углубления под большим углом. Так, для  $Re_d = 40000$  выброс наклонных вихрей наблюдается под углом порядка  $45^\circ$ , а при  $Re_d = 60000$  – около  $60^\circ$ .

Численное моделирование вихревого течения в одиночной сферической лунке с относительным углублением 0.26, расположенной на стенке узкого канала, подобного гидродинамическому каналу в Университете г. Росток, показало, что при  $Re_d = 40000$  внутри лунки формируется асимметричная вихревая система. Картина графической визуализации, полученная в работе [27], представлена на рис. 4. Так же, как и в физическом эксперименте, внутри лунки формируется наклонная вихревая система, источник которой располагает-

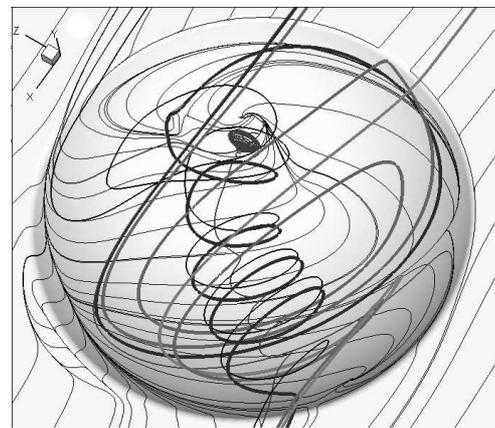


Рис. 4. Трехмерное вихревое течение внутри сферической лунки 0.26 для  $Re_d = 40000$

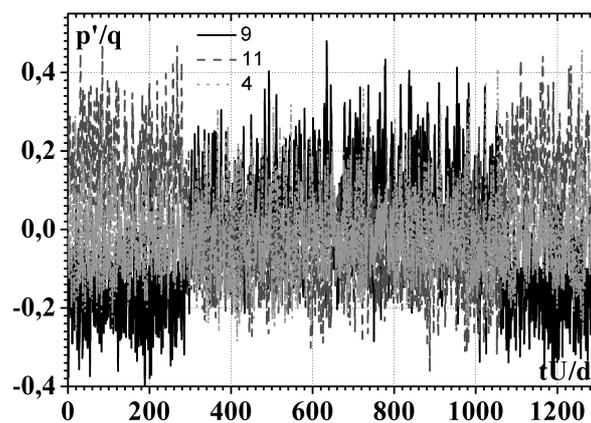


Рис. 5. Изменение пульсаций пристеночного давления во времени на кормовой стенке лунки

ся на передней стенке лунки, а выброс происходит над противоположной боковой стороной кормовой стенки. Как показали результаты расчетов, наклонная асимметричная вихревая система периодически формируется внутри лунки то с одной ее стороны, то с противоположной [28, 29], что соответствует картине течения, показанной на рис. 3.

Для идентификации переключательного режима формирования асимметричных вихревых структур, генерируемых внутри глубокой сферической лунки при ее турбулентном обтекании, использовались два ансамбля датчиков пульсаций пристеночного давления и датчиков статического давления, которые устанавливались в характерных областях формирования и развития асимметричных вихревых структур. В результате удалось получить информацию о поле давлений на поверхности лунки, а также его пространственно-временные корреляции и взаимные спектры, характеризующие кинематические и динамические характеристики источников псевдозвуковых пульсаций пристеночного давления, которыми являются вихревые структуры. Изменения поля давления во времени на кормовой стенке лунки при  $Re_d = 40000$ , измеренные низкочастотными пьезорезистивными датчиками, показаны на рис. 5. Датчики № 9 и № 11 располагались на противоположных боковых сторонах кормовой стенки лунки, как показано на рис. 2, а датчик № 4 находился в срединном сечении кормовой стенки. Пульсации давления нормированы динамическим давлением  $q = \rho U^2 / 2$ , а время – среднерасходной скоростью и диаметром лунки. Как показывают результаты исследований, на боковых сторонах кормовой стенки пульсации пристеночного давления находятся в противофазе. В срединном сечении кормовой стенки поле пульсаций давления осциллирует вокруг нулевого значения без какого-либо преобладания положительных или отрицательных пульсаций. Противофазные колебания на боковых сторонах лунки переключались на противоположные примерно через (30...40) с в полном соответствии с визуальными наблюдениями.

Значения коэффициента пространственно-временной корреляции, измеренные вдоль кормовой стенки сферической лунки, представлены на рис. 6 и 7. Результаты, показанные на рис. 6, получены посредством пьезорезистивных датчиков, которые регистрируют низкочастотные пульсации давления, а данные рис. 7 измерены с помощью пьезокерамических датчиков, обладающих повышенным быстродействием. Оба комплекса измерений показывают, что между датчиками пульсаций давления, находящимися

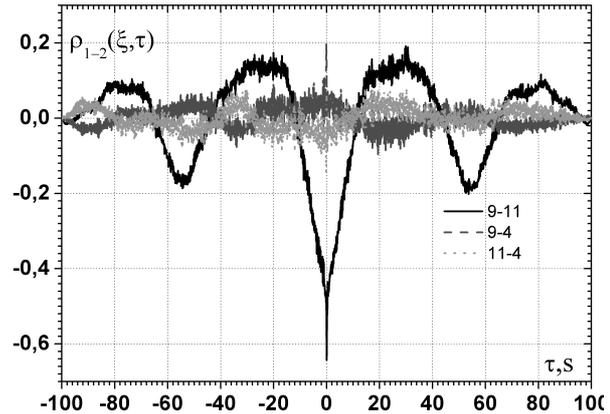


Рис. 6. Пространственно-временная корреляция пульсаций пристеночного давления на кормовой стенке лунки, измеренная низкочастотными датчиками

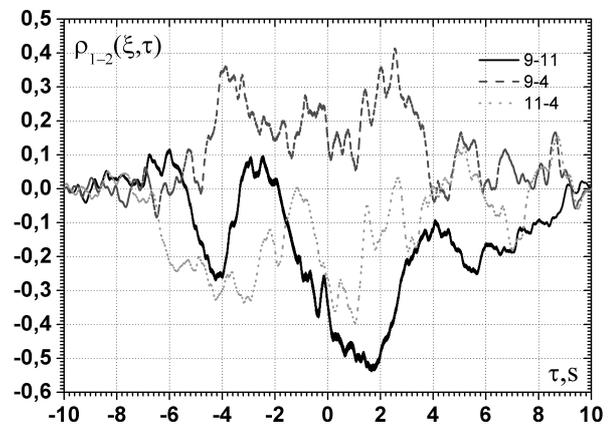


Рис. 7. Пространственно-временная корреляция пульсаций пристеночного давления на кормовой стенке лунки, измеренная миниатюрными пьезокерамическими датчиками

на противоположных сторонах кормовой стенки относительно ее срединного сечения, наблюдаются противофазные колебания. Им отвечает коэффициент взаимной корреляции, имеющий большие отрицательные значения ( $< -0.5$ ), что указывает на преобладание в осциллирующем вихревом движении вблизи кормовой стенки лунки коррелированных сигналов, источниками которых могут быть крупномасштабные наклонные вихревые системы. Такие системы генерируют пониженные пульсации давления на кормовой стенке [30, 31], где происходит выброс крупномасштабного вихря, и повышенные давления там, где наблюдается ударное взаимодействие вихревых структур слоя смешения с кормовой стенкой. Эти же особенности отмечались при анализе

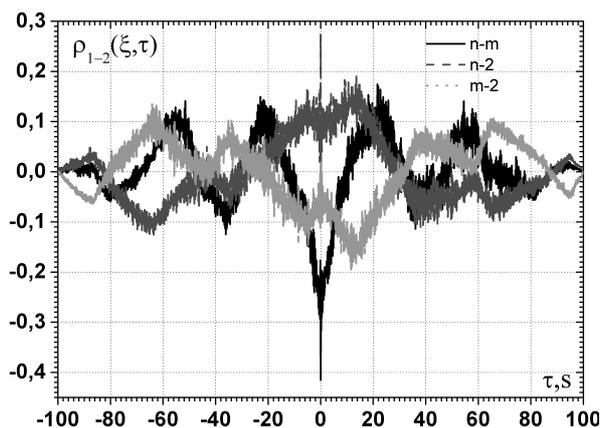


Рис. 8. Пространственно-временная корреляция пульсаций пристеночного давления на передней стенке лунки

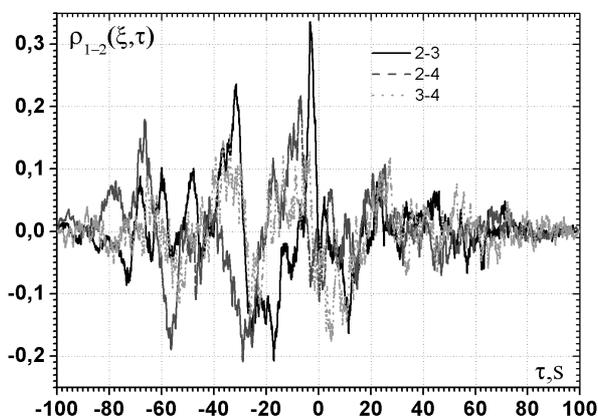


Рис. 9. Взаимная корреляция пульсаций пристеночного давления вдоль срединного сечения лунки

временных зависимостей изменения пульсаций давления.

В срединном сечении кормовой стенки лунки поле пульсаций пристеночного давления коррелировано в фазе с поверхностными пульсациями давления одной боковой части кормовой стенки лунки и в противофазе с другой частью лунки. При этом синфазные колебания поля пульсаций давления в исследуемых точках обтекаемой поверхности лунки наблюдались там, где больший отрезок времени наблюдений происходило ударное взаимодействие вихревых структур слоя смешения с кормовой стенкой (область повышенных уровней пульсаций давления). Следует также отметить, что коррелированность синфазных и противофазных колебаний на кормовой стенке практически одинакова (коэффициент пространственно-временной корреляции достигает значений порядка 0.2 и 0.4

для демпфированного и высокочастотного датчиков соответственно).

На передней стенке сферической лунки, где происходит отрыв пограничного слоя набегающего потока и зарождается слой смешения, также наблюдаются противофазные и синфазные колебания течения. Однако здесь значение коэффициента взаимной корреляции для датчиков, находящихся на противоположных боковых стенках лунки, несколько ниже, а корреляция между пульсациями пристеночного давления, измеренными в срединном сечении лунки и на боковых сторонах передней стенки, наоборот, – выше (рис. 8). При этом функции взаимной корреляции в этих точках измерений практически симметричны относительно оси абсцисс как на кормовой, так и на передней стенках исследуемой сферической лунки.

В продольном сечении сферической лунки наблюдаются синфазные и противофазные коррелированные пульсации пристеночного давления с преобладанием синфазной составляющей (рис. 9). Наряду с этим можно отметить, что коррелированность в этом сечении почти в два раза ниже, чем на кормовой стенке углубления. Кроме того, наименьшие значения коэффициента взаимной корреляции обнаружены между датчиками пульсаций давления, расположенными вблизи кормовой стенки, а максимальные – между дном лунки и передней стенкой. Следовательно, при разрушении слоя смешения на кормовой стенке лунки и трансформации крупномасштабных вихревых структур в мелкие вихри, перемещающиеся от кормовой стенки ко дну углубления в результате циркуляционного течения, отмечается пониженная коррелированность этих мелкомасштабных источников пульсаций пристеночного давления. Также следует указать, что коррелированность пульсаций давления в этом сечении имеет большие значения при отрицательных временах задержки. Это свидетельствует о том, что коррелированные источники пульсаций, которыми являются вихревые структуры, генерируемые внутри лунки, перемещаются от кормовой стенки лунки вдоль ее дна к передней стенке.

Как показано на рис. 10, а, функция когерентности между датчиками пульсаций пристеночного давления, находящимися на кормовой стенке сферической лунки, близка к нулевому значению (между сигналами отсутствует линейная связь) в области высоких частот. В области же низких частот, обусловленных действием крупномасштабных вихревых структур (источников пульсаций пристеночного давления), функция когерентности – ненулевая и на отдельных частотных ком-

понентах принимает довольно высокие значения ( $> 0.5$ ). Для наглядности и анализа результатов исследований низкочастотная часть функций когерентности представлена в большем масштабе на рис. 10, б. На этом графике отчетливо просматриваются тональные подъемы зависимостей функций когерентности на частотах порядка 13, 15 и 18 Гц, а также в области инфранизких частот до 2 Гц. Следует отметить, что при 18 Гц наблюдается довольно высокая коррелированность исследуемых сигналов пульсаций пристеночного давления по всей ширине кормовой стенки лунки. Однако наибольшая когерентность на этой частоте имеет место между датчиками пульсаций давления № 9 и № 4. Максимум функции когерентности отмечен между крайними исследуемыми измерительными точками на кормовой стенке – датчиками № 9 и № 11 – на частоте порядка (0.02...0.05) Гц.

Как показали визуальные исследования, а также измерение поля пульсаций скорости и давления, эта частота обусловлена действием переключательного механизма генерации и развития крупномасштабных наклонных вихревых структур. Переключение вихревых структур из одной боковой части лунки в другую и выброс вихрей в пограничный слой позади лунки представляет собой низкочастотный модулирующий колебательный процесс, оказывающий существенное влияние на формирование вихрей внутри лунки, а также на вихревое течение позади нее. Функция когерентности между измерительной точкой, находящейся на кормовой стенке в срединном сечении лунки (датчик № 4), и измерительными точками, расположенными на боковых кормовых ее частях (датчики № 9 и № 11), имеет высокие значения (вплоть до 0.5) на частотах, представляющих собой высшие гармоники частоты переключательного процесса (см. рис. 10, б). В области частот порядка (10...20) Гц наблюдается довольно высокая коррелированность пульсаций пристеночного давления по всей кормовой стенке лунки, что обусловлено частотой вращения асимметричного вихря и ударным взаимодействием вихревых структур слоя смещения с кормовой стенкой.

Функции когерентности пульсаций пристеночного давления, измеренные на передней стенке сферической лунки, представлены на рис. 11, а и б в различных масштабах по частоте для наглядности проведения частотного анализа данных. В области высоких частот когерентность между измерительными точками, расположенными вдоль передней стенки лунки, отсутствует, а коррелированными остаются только низкочастотные пульсации. При этом функция когерентности име-

ет высокие значения в узких частотных полосах, ограниченных сверху частотой порядка 40 Гц. Это свидетельствует о том, что вдоль передней стенки лунки нет коррелированных мелкомасштабных источников пульсаций пристеночного давления, обуславливающих высокочастотные пульсации, а вдоль нее конвектируют коррелированные крупномасштабные вихревые структуры, генерирующие тональные пульсационные поля скоростей и давлений.

Низкочастотная часть функций когерентности пульсаций давления на передней стенке лунки, представленная на рис. 11, б, показывает, что в диапазоне частот порядка (10...20) Гц наблюдается очень высокая коррелированность пульсаций. Она сохраняется вдоль всей передней стенки лунки, а ее максимум наблюдается на частоте порядка 18 Гц, подобно полю пульсаций пристеночного давления на кормовой стенке. Кроме того, дискретные подъемы значений функций когерентности имеют место на гармониках высших порядков основной частоты и ее субгармониках, подчиняясь законам биспектрального анализа, где частоты удовлетворяют равенству  $f_3 = f_1 + f_2$ . Между боковыми сторонами передней стенки лунки высокие уровни когерентности наблюдаются на инфранизких частотах, отвечающих модулирующей частоте переключательного механизма вихреобразования внутри лунки. На боковой стороне, где располагается источник менее интенсивного асимметричного наклонного вихря, относительно высокая когерентность регистрируется на частоте порядка (1...1.5) Гц, в то время как в области расположения источника более интенсивного вихря повышенная когерентность отмечена на второй гармонике основной частоты осцилляций поля пульсаций пристеночного давления (около 36 Гц).

Функции когерентности, измеренные вдоль срединного сечения обтекаемой поверхности лунки, кардинальным образом отличаются от функций когерентности для кормовой и передней стенок сферической лунки (сравни рис. 10, 11 и 12). Так, в осевом сечении лунки значительная когерентность пульсаций пристеночного давления наблюдается в области высоких частот. При этом наиболее коррелированы давления, измеренные на передней и кормовой стенках лунки – между датчиками № 2 и № 4. Между этими точками измерений когерентность максимальна в области частот порядка 18 Гц (см. рис. 12, а). Минимальные значения функции когерентности наблюдаются для поля пульсаций давления, измеренного между кормовой стенкой лунки и ее дном. Эта тенденция прослеживается как на высоких частотах,

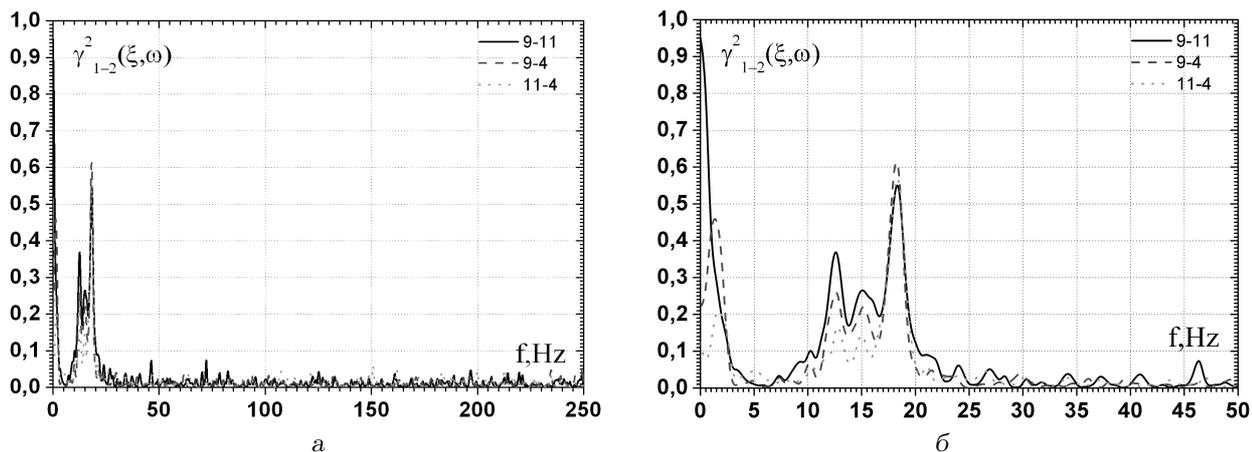


Рис. 10. Функция когерентности пульсаций пристеночного давления на кормовой стенке сферической лунки:  
 а – широкий диапазон; б – низкочастотный диапазон

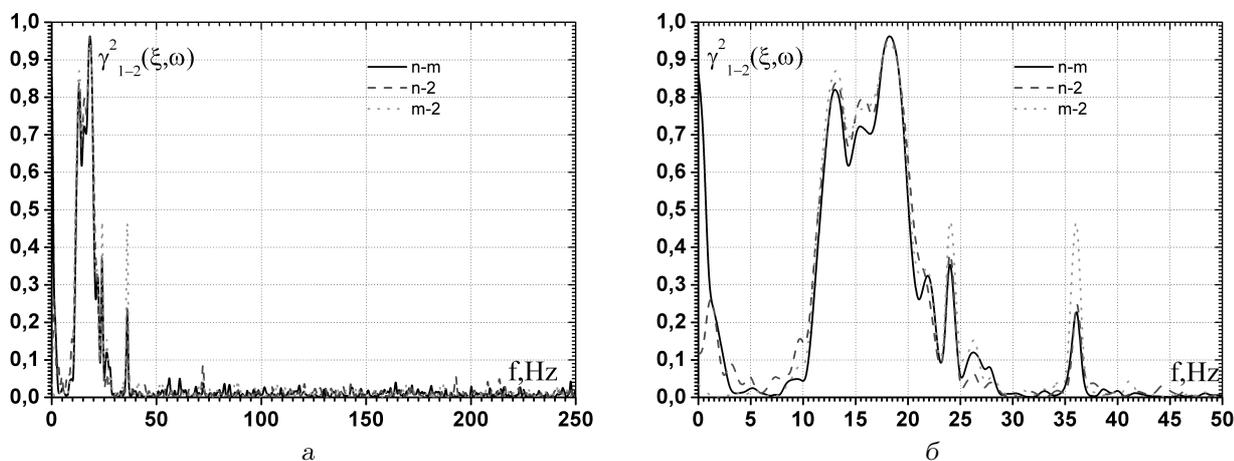


Рис. 11. Функция когерентности пульсаций пристеночного давления на передней стенке сферической лунки:  
 а – широкий диапазон; б – низкочастотный диапазон

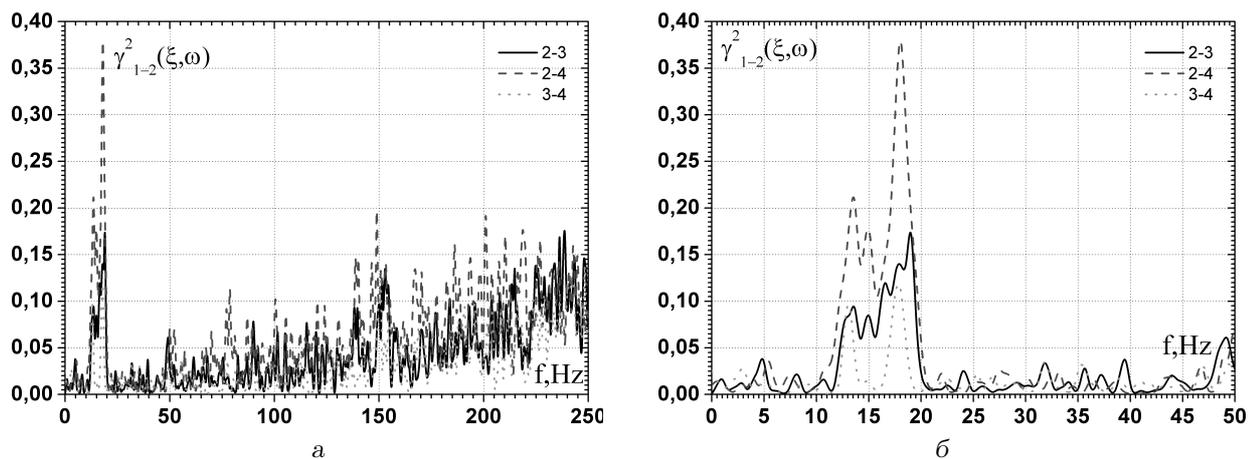


Рис. 12. Функция когерентности пульсаций пристеночного давления вдоль срединного сечения лунки:  
 а – широкий диапазон; б – низкочастотный диапазон

где пульсации давления обусловлены действием мелкомасштабных высокочастотных вихрей, так и на низких (см. рис. 12, б). В отличие от исследований на кормовой и передней стенках лунки, в осевом сечении ее обтекаемой поверхности когерентность пульсаций давления в инфранизкой области спектра не наблюдается. По всей видимости, интенсивность движения вихревых структур в срединном сечении лунки, обусловленная переключательным механизмом генерации крупномасштабных вихрей, незначительна. В области частот порядка (10...20) Гц в этом сечении полусферической лунки когерентность довольно высока (см. рис. 12, б), хотя и ниже, чем на кормовой и в особенности передней стенках. При этом для исследуемых измерительных точек обтекаемой поверхности пиковые значения функций когерентности имеют место на частотах порядка 13 и 18 Гц, а их максимум наблюдается для когерентности между датчиками № 2 и № 4. Когерентность пульсаций пристеночного давления между дном лунки и кормовой, а также передней стенками лунки для этих частот почти в два раза ниже.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали визуальные исследования и изменение поля пульсаций пристеночного давления на поверхности глубокой сферической лунки, обтекаемой турбулентным потоком, внутри лунки формируется сложное вихревое течение, которое периодически выбрасывается наружу. В лунке генерируются крупномасштабные асимметричные вихревые структуры, располагающиеся наклонно к направлению набегающего потока. Эти структуры имеют источник на передней стенке в ее придонной части, несколько сбоку от срединного сечения лунки. Сток вихревой структуры находится над противоположной кормовой стенкой. Периодически вихревая структура выбрасывается наружу над кормовой стенкой лунки под углом порядка  $45^\circ$  к направлению течения. С увеличением скорости потока угол выброса возрастает (например, при  $Re_d = 60000$  он достигает  $60^\circ$ ). Исследования показали, что для турбулентного режима течения наблюдается переключение вихревого течения из одного наклонного положение в другое, что приводит к появлению выброса асимметричной структуры над противоположной боковой частью кормовой стенки. Вихревая структура находится в одном из возможных наклонных положений в среднем порядка (30...40) с, но нередко эти интервалы оказываются короче.

Переключение вихревого течения из одного наклонного положения в другое вызывает изменения поля пульсаций давления как на передней, так и на кормовой стенке. Осцилляции давления на боковых сторонах полусферической лунки имеют противофазный характер. При этом переключение происходит через безразмерное время  $tU/d \approx (600 \dots 700)$ .

Если предположить, что частота 18 Гц, наблюдаемая на всех измеренных функциях когерентности, является частотой вращения крупномасштабных асимметричных вихрей, то можно оценить их масштаб. Предположим, что линейная скорость вращения такого вихря составляет порядка (0.5...0.6) скорости потока. Как указано в исследованиях [23, 28, 32, 33], эта скорость близка к скорости переноса вихревых структур сдвигового слоя. Тогда, учитывая зависимость  $U_v = \omega r_v$ , где  $U_v$  – линейная скорость вихря,  $f = \omega/2\pi$  – частота его вращения, а  $r_v$  – радиус асимметричного наклонного вихря, получаем, что радиус вихря составляет порядка (4...5) мм. Если принять во внимание, что исследуемая лунка имеет глубину 12 мм, а ее радиус составляет 23 мм, то крупномасштабный вихрь, располагающийся наклонно под углом  $45^\circ$  к направлению потока вполне может иметь эквивалентный радиус порядка (4...5) мм, вращаться с частотой 18 Гц и линейной скоростью, близкой к  $0.5U$ .

Таким образом, крупномасштабные асимметричные вихри, переключающиеся из одной боковой части лунки в противоположную с частотой близкой к (0.02...0.03) Гц или  $St = fd/U = (0.001 \dots 0.002)$ , имеют поперечный масштаб порядка 10 мм или  $0.2d$ . Эти вихри вращаются с частотой около 18 Гц ( $St \approx 1$ ). Они генерируют противофазные пульсации пристеночного давления, которые регистрируются на противоположных боковых сторонах передней и кормовой стенок сферической лунки. Кроме того, большие значения антикорреляции на боковых сторонах лунки обусловлены низкочастотными колебаниями, наблюдаемыми в зависимостях функций когерентности между соответствующими измерительными точками пульсаций полного и пристеночного давлений. Между датчиками, расположенными в осевом сечении лунки, а также теми, которые находятся на боковых частях передней и кормовой стенок, не зарегистрировано ни существенных противофазных корреляций, ни когерентности в низкочастотных областях. Вдоль придонной части лунки, проходящей по ее срединному сечению, наблюдается довольно значительная взаимная корреляция. Она об-

условлена частотой вращения вихря, а также колебаниями вихревого течения на ее субгармониках и высших гармониках, возбуждаемых трансформацией этих вихревых структур, а также нелинейным их взаимодействием между собой и обтекаемой поверхностью [34, 35]. Наряду с этим, функции когерентности между парами датчиков, установленными вдоль срединного сечения лунки, насыщены коррелированными высокочастотными пульсациями давления при отсутствии коррелированных низкочастотных пульсаций.

## ВЫВОДЫ

1. Внутри лунки формируются крупномасштабные асимметричные вихревые структуры, источник которых находится на передней стенке лунки несколько сбоку от срединного сечения лунки, а сток располагается на противоположной боковой стороне кормовой стенки лунки, т. е. вихрь имеет наклонное положение и пересекает срединное сечение лунки. Совершая колебательное движение, асимметричный вихрь периодически выбрасывается над кормовой стенкой под углом, который растет с увеличением скорости турбулентного течения. Установлено, что при числе Рейнольдса  $Re_d = 40000$  угол выброса вихря равен приблизительно  $45^\circ$ , а при  $Re_d = 60000$  – уже почти  $60^\circ$ . При  $Re_d = 40000$ , находясь в наклонном положении порядка  $(30 \dots 40)^\circ$ , асимметричный вихрь переключается в противоположную боковую часть лунки и в течение такого же (или меньшего) временного промежутка выбрасывается над противоположной боковой стороной кормовой стенки лунки.
2. Обнаружено, что при переключении вихревого течения из одной стороны лунки в другую поле пульсаций пристеночного давления совершает противофазные колебания в половинках лунки, разделенных продольной осевой плоскостью. Это подтверждается измерениями с помощью датчиков давления, расположенных на боковых сторонах передней и кормовой стенок полусферической лунки. При этом между парами датчиков, установленными на противоположных боковых стенках, отмечаются высокие уровни пространственно-временной антикорреляции. Когерентность поля пульсаций давления в этих точках измерения имеет высокие значения на определенных частотах, отвечающих

частотам переключательного режима вихревого течения, частотам выбросов вихревых структур наружу из лунки, частотам их вращения, а также субгармоникам и гармоникам высших порядков.

3. Установлено, что крупномасштабные асимметричные вихревые структуры имеют продольный размер порядка диаметра лунки и поперечный эквивалентный радиус около  $0.1d$ . Они наклонены в плоскости лунки под углом порядка  $(45 \dots 60)^\circ$  в зависимости от скорости потока, а частота их вращения, например, для  $Re_d = 40000$  составляет около 18 Гц, что соответствует числу Струхала порядка 1. Вдоль срединного сечения лунки коррелированность поля пульсаций пристеночного давления в значительной степени обусловлена высокочастотными пульсациями. Источниками их являются мелкомасштабные вихри, зарождающиеся, преимущественно, на кормовой стенке лунки при разрушении крупномасштабного вихря и при ударном взаимодействии вихревых структур сдвигового слоя с этой стенкой.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность и искреннюю признательность проф. Н. В. Корневу, проф. Г. А. Воропаеву и проф. С. А. Исаеву за активное участие в обсуждении и анализе результатов исследований, докт. техн. наук В. Л. Жданову и канд. техн. наук А. В. Воскобойнику за участие в проведении экспериментальных работ и обработке результатов исследований. Работа выполнена в ходе научной стажировки автора в Университете г. Росток (Германия) при организационной и финансовой поддержке Немецкой службы академических обменов (DAAD).

1. Петровский В. С. Гидродинамические проблемы турбулентного шума. – Л.: Судостроение, 1966. – 252 с.
2. Смольяков А. В. Шум турбулентных потоков. – С.-Пб.: ЦНИИ им. акад. А. И. Крылова, 2005. – 312 с.
3. Blake W. K. Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols. – New York: Academic Press, 1986. – 974 p.
4. Bull M. K. Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // J. Sound Vib. – 1996. – 190, № 3. – P. 299–315.

5. Dowling A. P. Underwater flow noise // *Theor. Comput. Fluid Dyn.*– 1998.– **10**.– P. 135–153.
6. Dhanak M. R., Dowling A. P. On the pressure fluctuations induced by coherent vortex motion near a surface // *AIAA Pap.*– 1995.– № 2240.– P. 1–15.
7. Dhanak M. R., Dowling A. P., Si C. Coherent vortex model for surface pressure fluctuations induced by the wall region of a turbulent boundary layer // *Phys. Fluids.*– 1997.– **9**, № 10.– P. 2716–2731.
8. Orlandi P., Jimenez J. On the generation of turbulent wall friction // *Phys. Fluids.*– 1994.– **6**, № 2.– P. 634–641.
9. Ahn B.-K., Graham W. R., Rizzi S. A. Modelling unsteady wall pressures beneath turbulent boundary layers // *AIAA Pap.*– 2004.– № 2849.– P. 1–12.
10. Camussi R., Robert G., Jacob M. C. Cross-wavelet analysis of wall pressure fluctuations beneath incompressible turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.*– 2008.– **617**.– P. 11–30.
11. Jayasundera S., Casarella M., Russel S. Identification of coherent motions using wall pressure signatures // *Cathol. Univ. America, Washington DC, Tech. Rep.*– 1996.– № 19960918-036.– P. 1–36.
12. Johansson A. V., Her J.-Y., Haritonidis J. H. On the generation of high-amplitude wall-pressure peaks in turbulent boundary layers and spots // *J. Fluid Mech.*– 1987.– **175**.– P. 119–142.
13. Farabee T. M., Casarella M. J. Spectral features of wall pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Phys. Fluids.*– 1991.– **3**, № 12.– P. 2410–2420.
14. Bradshaw P. Inactive motion and pressure fluctuations in turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.*– 1967.– **30**.– P. 241–258.
15. Aditjandra A., Trosin B. J., Naguib A.M. Array measurements of the surface pressure beneath a forced axi-symmetric separation bubble // *Exp. Fluids.*– 2009.– **46**.– P. 297–308.
16. Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Исаев С. А., Розумнюк Н. В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // *Акуст. вісн.*– 2008.– **11**, № 3.– С. 34–58.
17. Willmarth W. W. Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Ann. Rev. Fluid Mech.*– 1975.– **7**.– P. 13–37.
18. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Напівсферичне заглиблення – генератор вихорів на плоскій обтічній поверхні // *Пробл. водопостач., водовідвед. гідравл.*– 2007.– **8**.– С. 151–161.
19. Arguillat B., Ricot D., Baillya C., Robert G. Measured wavenumber: Frequency spectrum associated with acoustic and aerodynamic wall pressure fluctuations // *J. Acoust. Soc. Amer.*– 2010.– **128**, № 4.– P. 1647–1655.
20. Rowley C. W., Colonius T., Basu A. J. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities // *J. Fluid Mech.*– 2002.– **455**.– P. 315–346.
21. Rockwell D., Knisely C. The organized nature of flow impingement upon a corner // *J. Fluid Mech.*– 1979.– **93**.– P. 413–434.
22. Bres G.A., Colonius T. Three-dimensional instabilities in compressible flow over open cavities // *J. Fluid Mech.*– 2008.– **599**.– P. 309–339.
23. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Олейников В. Г., Городков А. Ю. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологии, сопровождающие это явление // *Третья междунар. конф. "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках"*.– Москва, Россия, 2008.– С. 1–3.
24. Byun G., Simpson R. L. Surface-pressure fluctuations from separated flow over an axisymmetric bump // *AIAA J.*– 2010.– **48**, № 10.– P. 2397–2405.
25. Remmler S., Christophe J., Anthoine J., Moreau A. Computation of wall-pressure spectra from steady flow data for noise prediction // *AIAA J.*– 2010.– **48**, № 9.– P. 1997–2007.
26. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).– К.: ИТГФ НАНУ, 2005.– 76 с.
27. Isaev S. A., Kornev N. V., Leontiev A. I., Hassel E. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // *Int. J. Heat Mass Transfer.*– 2010.– **53**.– P. 178–197.
28. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // *VI минск. междунар. форум по теплообмену, ММФ 2008*.– Минск: Беларусь, 2008.– С. 1–9.
29. Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex-jet mechanism in a channel with spherical dimples for heat transfer augmentation // *Pap. Sixth Int. Sympos. Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP-6: Vol. 1.*– Seoul: Korea, 2009.– P. 321–326.
30. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Источники резонансных мод осцилляций внутри обтекаемой полусферической лунки // *Акуст. вісн.*– 2007.– **10**, № 4.– С. 36–46.
31. Voropaev G. A., Voskoboinick V. A., Rozumnyuk N. V., Voskoboinick A. V. Vortical flow features in a hemispherical cavity on a flat plate // *Pap. Sixth Int. Sympos. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP-6: Vol. 3.*– Seoul: Korea, 2009.– P. 563–568.
32. Халатов А. А., Коваленко Г. В., Терехов В. И. Режимы течения в единичном углублении, имеющем форму сферического сегмента // *VI минск. междунар. форум по теплообмену, ММФ 2008*.– Минск, Беларусь, 2008.– С. 1–10.
33. Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Характеристики пульсаций псевдозвукового давления в лунке при малых числах Рейнольдса // *Акуст. вісн.*– 2009.– **12**, № 4.– С. 10–22.
34. Robinson S. K. Coherent motions in the turbulent boundary layer // *Ann. Rev. Fluid Mech.*– 1991.– **23**.– P. 601–630.
35. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Взаємні статистичні характеристики пульсацій швидкості та тиску в напівсферичному заглибленні // *Вісн. Донецьк. ун-ту, Сер. А: Природничі науки.*– 2010.– **2**.– С. 64–70.